库布齐沙漠社会经济系统动态仿真及其应用

卢方园[1,2]， 贾德彬[1,2]， 高瑞忠[1,2]， 苏文旭[1,2]， 赵 航[1,2]， 杨丽娜[1,2]

（1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；
2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010010）

摘　要：在整合1999—2019年库布齐沙漠区域水资源和社会经济数据的基础上，采用系统动力学模型对库布齐沙漠水资源-社会-生态系统进行仿真模拟，分析1999—2019年库布齐沙漠社会经济和用水时空变化特征，同时建立多情景参数调控模型，综合模拟在不同参数影响下该地区水资源需水总量变化。结果表明：(1) 不采取其他措施情况下（常规发展模式），2035年需水总量达11.90×10^8 m³，大于该区域供水总量，呈超载状态。(2) 通过不同参数方案调节后，保持该区域种植面积不变，现状灌溉方式不变，需水量为9.76×10^8 m³，滴灌普及率达50%以上（S3），将处于可载状态，且需水量下降至7.80×10^8 m³，对沙漠水资源供需矛盾有所缓解。建议在建设库布齐沙漠生态恢复过程中，应着重推广滴灌节水，合理使用当地水资源，持续发展生态。

关键词：水资源承载力；系统动力学；沙漠；干旱区；库布齐沙漠

在全球生态安全治理过程中，荒漠化是面临的最大挑战之一，不仅对生态造成恶劣影响，还对社会经济有重大影响，沙漠化是荒漠化的一种典型类型，也是危害最大的一种荒漠化类型[1-2]。近年来，沙漠化治理逐渐引起高度关注。因此，正确协调沙漠化防治的各方面关系十分关键。黄河流域是我国重要的生态防护带和经济发展区，对黄河流域的生态保护和高质量发展已成为国家重要部署，同时黄河流域又是生态环境脆弱带[3-5]。为此，本研究以典型荒漠化生态环境脆弱区——库布齐沙漠为研究区，采用系统动力学模型，分析库布齐沙漠地区社会经济用水时空变化特征以及动态模拟不同参数方案下水资源承载状态，为库布齐沙漠生态环境的改善与社会经济的可持续发展提供强有力的支撑。

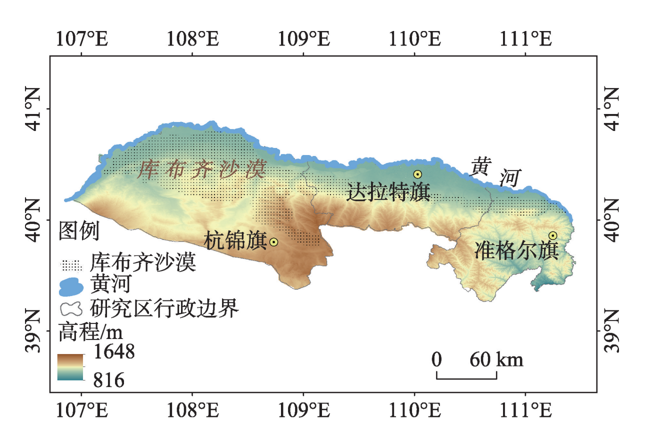
水资源承载力是对区域水资源承载状态的重要衡量指标，正确评价区域水资源承载力，既是合理调控区域水资源配置的前提基础，也是实现水资源可持续发展的必要条件[6-8]。水资源承载力发展初期的研究方法多偏向于静态研究，例如层次分析法、模糊评价法等，该时期的研究方法往往忽略了人口-经济-水资源系统内部的关系[9-11]，因此，在后续研究中系统动力学（System Dynamics，SD）、多目标情景规划等动态研究方法逐步改善了初期研究方法的缺点，更综合、完整地考虑水资源承载力在整体系统中的变化[12-14]。系统动力学的优点就是在其研究过程中可用于分析多层次、非线性、复杂的系统问题，水资源承载力作为一个包含社会经济、水资源、生态环境等众多影响因素的复杂问题，需要可以处理多重复杂问题系统的研究方法来解决，系统动力学是应用于水资源承载力动态预测研究的重要方法[15]。但是，在运用系统动力学模型对水资源承载力进行仿真模拟时，仅考虑水资源供需补给关系容易忽略社会经济发展和人口等变量的影响[16]。因此，有研究逐渐考虑社会经济、生态环境、粮食能源等系统与水资源系统之间的相互作用。如利用区域的SD模型，建立水环境承载力预警体系，并确定当前区域超载情况[17]。同时，也有学者运用系统动力学模型，预测水资源与经济、社会和环境的响应关系[18-20]。

收稿日期：2021-10-14；　**修订日期：**2022-03-05
基金项目：内蒙古自治区科技重大专项“库布齐沙漠水资源可持续利用与植物耦合技术体系研发”（2019ZD002）；国家自然科学基金项目（51869018）
作者简介：卢方园（1996-），女，硕士研究生，主要从事水资源承载力及水资源合理配置等研究. E-mail: 892714610@qq.com
通讯作者：贾德彬. E-mail: jiadb@263.net

1 材料与方法

1.1 研究区概况

库布齐沙漠(39°30′28″~40°41′28″N，107°18′54″~111°30′46″E)位于黄河以南的鄂尔多斯高原北部边缘，沙漠总长约400 km，宽度为30~80 km，总面积约1.39×10⁴ km²。所处区域有杭锦旗、准格尔旗、达拉特旗3个旗县，主要种植玉米、葵花、小麦等作物。1999—2019年3个旗的三产结构由36.8:39.7:23.4调整为9.5:53:37.5，且GDP由29.94×10⁸元上升至659.17×10⁸元。该区域年均降水量约200~400 mm，年均蒸发量2162 mm，降水量分布不均，呈西北递减[21-23]。水资源总量稀少，区域用水结构中农业需水量最多，由于没有充足的水资源支撑，加之水资源开发利用过度，库布齐沙漠出现湖泊萎缩，绿洲土地沙化等问题。库布齐沙漠水资源承载状况复杂，是研究的重点区域。由于数据获取有限，本研究仅覆盖库布齐沙漠的行政区域(图1)。



注：底图采用内蒙古自治区自然资源厅标准地图制作，审图号为蒙S(2020)028号，对底图边界无修改。

图1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Location map of the study area

库布齐沙漠供水系统由3部分组成：地表水供水、地下水供水和再生水供水(污水回用)，其中地表用水量包括蓄水利用量、引提水量。图2能够更加清晰地表明区域内的水资源系统与社会供需水系统之间的关系[24]。

1.2 数据来源

数据包括社会经济数据和气象水文数据，时间序列为1999—2019年。所有统计资料均以库布齐沙漠内3个旗县为行政单元统计，具体数据来源参考《鄂尔多斯市统计年鉴》《鄂尔多斯市水资源公报》《全国第二次污染源普查生活源产排污系数手册》《内蒙古自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《内蒙古自治区用水定额》《鄂尔多斯市城市总体规划(2011—2030)》。

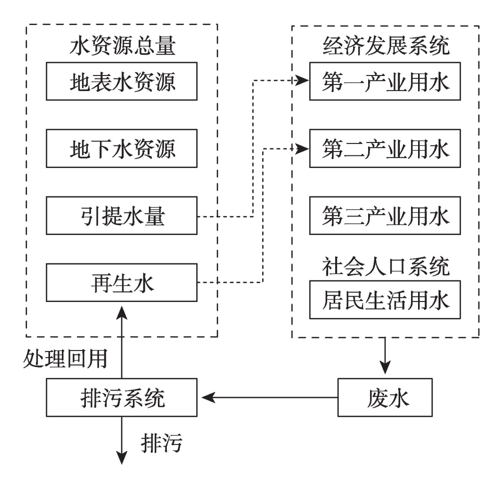


图2 研究区水的社会循环过程

Fig. 2 Social cycle process of water in the study area

1.3 研究方法

1.3.1 关键驱动指标识别方法 运用Pearson相关性分析、主成分分析法进行关键指标识别。Pearson相关性分析方法用于判别2个变量间的相关性，变化范围在-1~1之间，一般0.7以上说明关系非常紧密；0.4~0.7之间说明关系紧密；0.2~0.4说明关系一般。主成分分析则是通过降维、正交变换等原理考虑多个变量的相关性。

1.3.2 系统动力学仿真模型(SD) 系统动力学方法的原理是通过掌控系统各个指标之间的反馈关系进而对系统整体进行动态性和整体性分析[25]。本文运用系统动力学方法构建库布齐沙漠区域内各旗县水资源承载状态模拟模型，再利用整体建模方法，空间耦合各旗县模型，构建库布齐沙漠承载状态模拟模型。

水资源承载状态仿真模型由人口、经济、水资源和水污染排放子系统内变量组成，可充分明确该区域水资源与社会、生态环境的发展情况。构建该仿真模型的关键在于建立4个子系统之间的联系，从而建立各变量与水资源承载状态值间的联系，从机理上揭示承载状态演变规律[26]。

1.3.3 数据与参数处理 模型中选取的主要参数均通过常规数理统计计算方法确定，个别参数参考鄂尔多斯地区指标参数值，主要参数方程见表1。依

表1 SD模型主要参数及方程

Tab. 1 Main parameters and equations in the SD model

变量	单位	方程
人口	10^4人	人口=INTEG(人口增长量,人口初始值)
人口增长量	10^4人	人口增长量=人口×人口增长率/1000
工业产值	10^8元	工业产值=INTEG(工业产值增长量,工业产值初始值)
工业用水量	10^8 m^3	工业用水量=工业产值×单位工业产值耗水量/1000
灌溉面积	hm^2	灌溉面积=INTEG(灌溉面积增长量,灌溉面积初始值)
种植业用水量	10^8 m^3	种植业用水量=灌溉面积×亩均灌溉定额/1000
缺水系数	%	缺水系数=需水量/供水量×100%
水污染比	%	水污染比=污水排放量/总需水量

据1999—2019年各旗县总用水量及生活、工业、农业用水,结合人口、工业产值、灌溉面积计算居民生活用水定额、万元工业产值用水量和亩均灌溉用水量[27]。经计算,各旗县居民生活用水定额约为每人85~95 L·d^{-1},各旗县间无明显差异,其中城镇居民生活用水定额略高于农村,生活用水系统引入人口增长率、城市化率,确保合理计算生活用水量;各旗县万元工业增加值用水量通过工业用水量与工业产值比值计算得出[28],区分不同旗县间工业产值增长率、单位工业产值耗水量;该区污水集中处理率≥85%,工业排污系数和生活污水排放系数均参考排污系数手册以及历年公开的排污系数数据,分别取均值0.5和0.8。

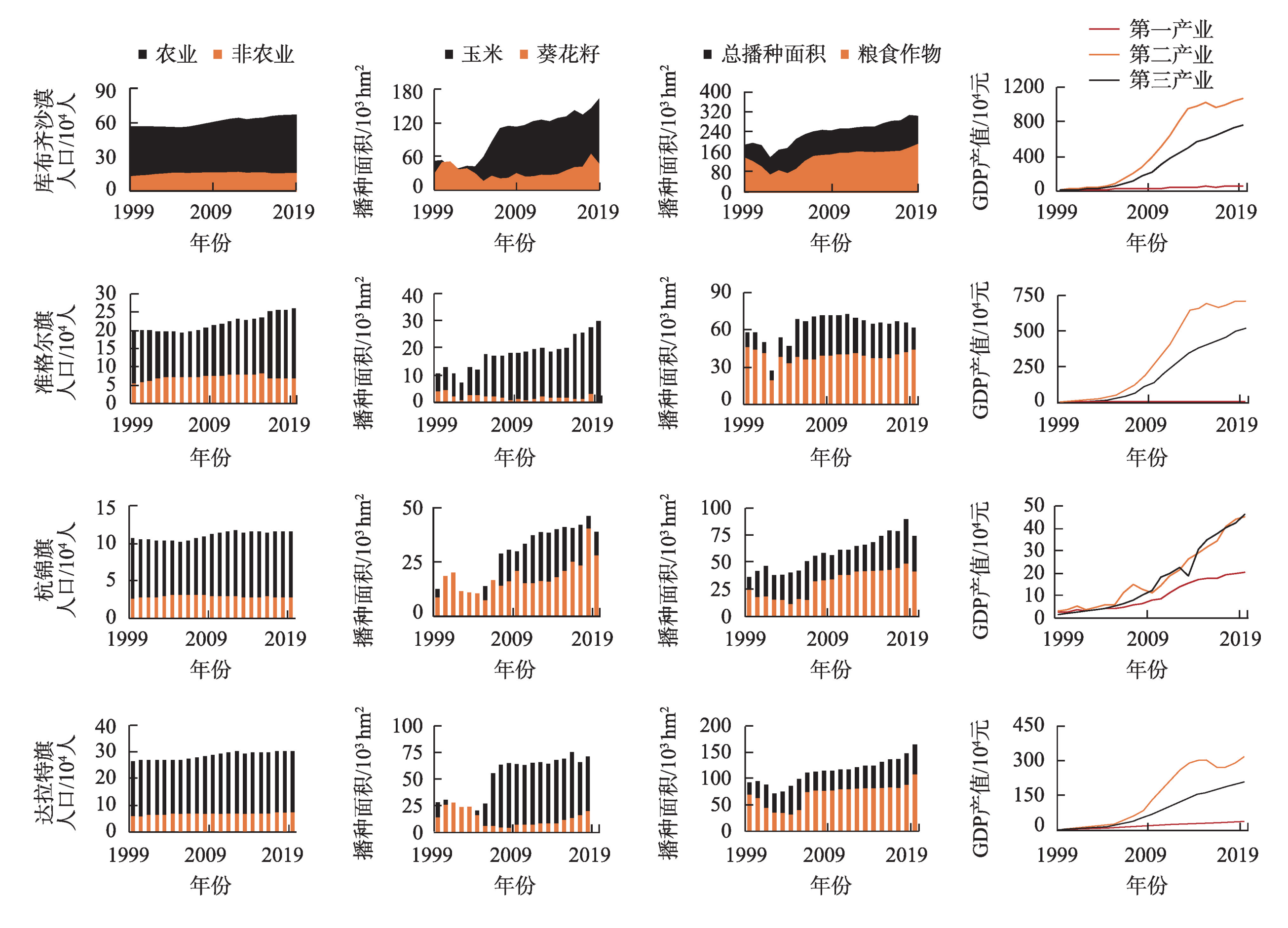
2 库布齐沙漠社会经济用水特征

2.1 库布齐沙漠社会经济发展分析

由图3可知,1999—2019年库布齐沙漠区域人口呈不断上升趋势,由72.03×10^{4}人上升至84.56×10^{4}人。准格尔旗、杭锦旗、达拉特旗分别占库布齐沙漠区域人口的39.1%、17%、43.9%(2019年),且库布齐沙漠区域以农村人口为主,各旗农村人口占比均在75%~85%之间。1999—2019年库布齐沙漠区域的农作物播种面积由19.49×10^4 hm^{2}增至30.07×10^4 hm^2。由于2000年当地政府退耕还林还牧的原因,2002年准格尔旗农作物播种面积下降了45%,2002年后农作物播种面积逐渐回升。1999—2019年杭锦旗和达拉特旗农作物播种面积也呈现先逐步下降后上升的趋势,与准格尔旗趋势一致。1999—2019年种植结构也发生了一定变化,玉米、向日葵成为主要种植作物,玉米作为3个旗主要种植粮食作物,占比约65%~95%。库布齐沙漠1999—2019年GDP呈现逐步上升趋势,其中第二产业GDP占比最大,约占40%~60%之间,工业用水以火力发电和开采煤炭为主。达拉特旗与准格尔旗第二产业增速均最快,杭锦旗第二、三产业增速趋于一致。

2.2 库布齐沙漠水资源现状分析

2019年,库布齐沙漠区域供水量8.50×10^8 m^3,而实际需水量达到9.18×10^8 m^3,缺水量为0.68×10^8 m^3,区域水资源供需矛盾突出。农业灌溉方面,供给水源主要来源于地下水,占总用水量的82%,为缓解该区域干旱程度,2015年起实施了生态引水工程,在黄河凌汛高水位时将部分凌汛水引入库布齐沙漠北缘低洼地,每年连续引水使区域出现较多湖泊湿地,形成水生态治理区,缓解了该地区水分对植被生长的限制作用,从而极大改善了库布齐北缘生态环境。通过分水引流,不仅为黄河缓解了汛期压力,还将水害转变为水利,提高了洪水的利用程度,推进了水资源管理方案的实施。但是水资源紧缺问题依旧是困扰沙漠地区治理的重要问题,在库布齐沙漠水生态综合治理工程实施后,多年累计引黄河水2.94×10 m^3。由于加大生态恢复力度以及推进节水建设,库布齐沙漠区域农业用水效率取得了明显提升,农田灌溉水利用系数由2015年的0.5078提高到了0.5520,但是目前高效节水普及率依旧不高,多以渠道节水为主,节水还有一定的提升空间,生活和工业用水也由1999年的7.6%增长至2019年的22.8%。运用Pearson相关性分析、灰色关联度以及主成分分析法对该区域用水影响指标进行识别,由表2可知,在可利用水量指标内,地表水资源量对可利用水量影响较大;在负荷指标里,农业用水量及农业用水量的驱动指标对用水量影响最大。



注:2019年数据采用2018年末统计总数。

图3 1999—2019年库布齐沙漠区域的人口、种植结构、播种面积和GDP产值变化

Fig. 3 Changes in population, planting structure, sown area and GDP output value in the Kubuqi Desert from 1999 to 2019

3 结果与分析

3.1 库布齐沙漠现状水资源系统仿真模拟

模型以1999—2019年的各区域人口、土地、水资源、生态环境和经济发展状况等历史数据为基础,时间边界为1999—2035年,其中1999—2019年为历史边界,2020—2035年为模型仿真预测时段,时间步长为1 a,以2019年作为仿真模拟的预测基准年,系统动力学模型由初始参数值、常量以及表函数构成。根据模型的历史性检验结果,确定模型的有效性[25-26]。

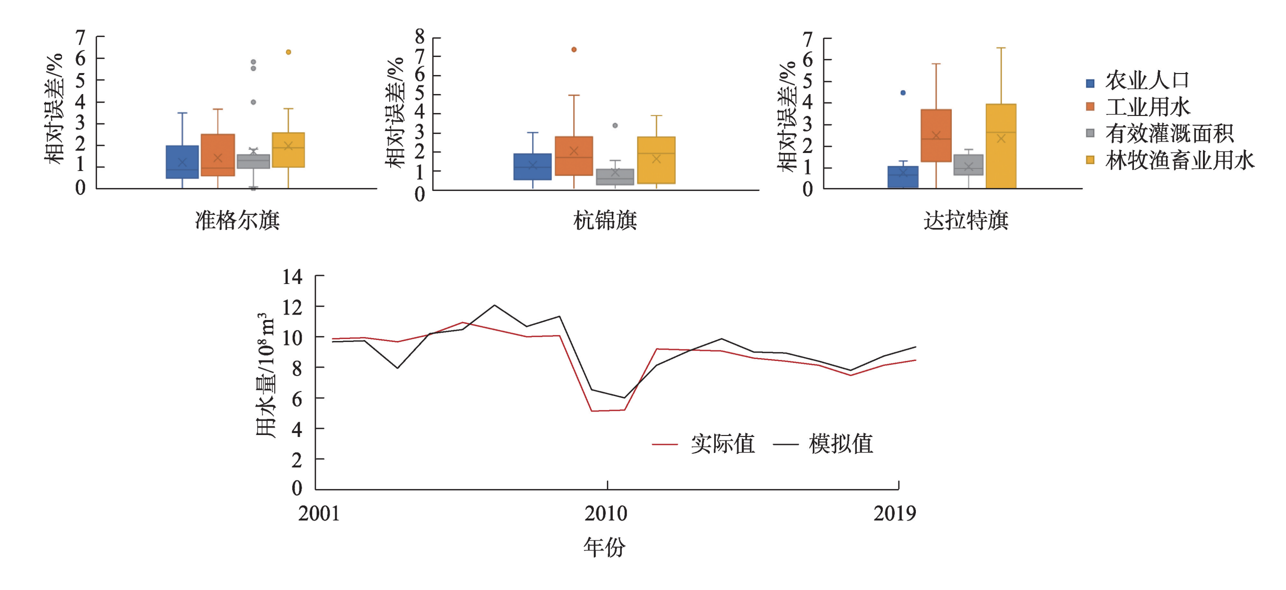
3.1.1 SD模型验证 系统动力学模型有效性检验的目的在于判断模型是否能够准确合理地反映出系统的特征及变化规律,对模型进行历史性检验,是为了验证模型的运行结果是否符合实际情况[29-32]。通过系统动力学模型仿真模拟1999—2019年的数据与真实获取的数据对比来验证模型的有效性,当误差小于10%时可认为模型是有效的。因本文变量较多,故列举部分指标进行验证,选取农业人口、工业用水量、有效灌溉面积、林牧渔畜业需水量以及用水总量作为检验指标。由模型验证结果(图4)可知,在所选取的变量中,达拉特旗林牧渔畜业需水量的相对误差绝对值相对较大,但超10%的年份个数较少,其他变量的相对误差绝对值都在10%以下,大多数小于5%。综合来看,模型拟合误差均在允许范围内,模型拟合效果较好。

3.1.2 基于SD的社会水资源系统结构 在建模过程中,通过对系统结构的分析掌握,确定系统内部主要变量之间的正负反馈关系,由此建立区域内的变量因果反馈关系图[33-34]。借助系统动力学方法建立库布齐沙漠所处行政区内的旗县社会经济用水模型,对县域用水情况进行全面了解。其中各旗县的总用水量包括生活、工业、农业以及生态用水,并考虑引入黄河水量对该区域供水总量的影响,因

表2　水资源承载状态关键驱动指标

Tab. 2　Key driving indicators of water resources carrying status

	可利用水量		用水量			
	指标	相关性	负荷指标	比重	负荷驱动指标	相关性
	地表水资源量	0.98			人口	0.86
					农业GDP	0.91
			农业用水量	0.83	灌溉面积	0.75
					亩均灌溉用水量	0.83
					人口	0.54
指标	地下水资源量	0.86	工业用水量	0.14	工业GDP	0.52
					万元工业增加值用水量	0.51
					人口	0.86
			生活用水量	0.02	农业GDP	0.89
					人均用水定额	0.98
	其他水源供水量	0.54	生态环境用水量	0.01		



注：图中圆点代表历史性检验中相对误差较大点。

图4　社会经济要素模拟结果与统计数据的相对误差及用水量模拟值与观测值对比

Fig. 4　Relative error between the simulation results of social economic factors and the statistical data, and the comparison of the simulated and observed water consumption values

此，在模型建立过程中将引提水量加入到供水系统中；利用缺水系数反映该地区水资源短缺程度。由生活用水、工业用水、农业用水、供水以及排污子系统构成模型。

在旗县承载状态流图的基础上，选取81个变量建立库布齐沙漠区域社会经济用水系统模型（图5），以保证模型完整性与合理性。模型中包含状态变量12个，速率变量12个，辅助变量51个，固定量6个，模型主要参数及方程见表1。其中农业用水约占库布齐沙漠区域总用水量的82%，因此农业用水子系统是模型的重点。

3.1.3　*库布齐沙漠常规发展模式下承载状态预测*

常规发展模式是在不改变库布齐沙漠水资源承载力模型中任何初始变量参数的前提条件下，维持目前的发展趋势，分析库布齐沙漠水资源承载力的变化情况。通过仿真模型运行后得出预测年份的主要指标预测值及指标变化趋势如表3和图6所示。根据表3可知，依照常规模式发展模拟后，达拉特旗、准格尔旗和杭锦旗均在2025年和2035年呈现超载状态（缺水指数>1），2019年准格尔旗处于承载

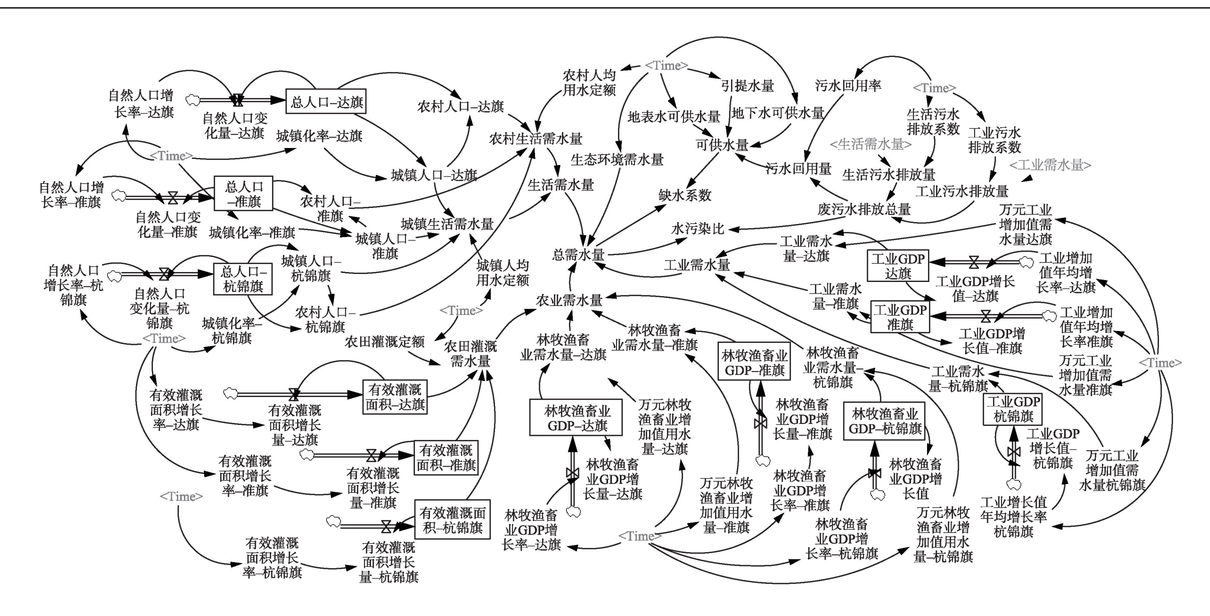


图5 库布齐沙漠常规发展模式水资源承载力系统动力学流图

Fig. 5 Dynamic flow diagram of water resource carrying capacity system in Kubuqi Desert

表3 常规发展模式下仿真模拟的承载状态值

Tab. 3 Simulation and simulation load-bearing state values in conventional development mode

地区	供水总量/10^8 m^3			需水总量/10^8 m^3			缺水系数		
	2019年	2025年	2035年	2019年	2025年	2035年	2019年	2025年	2035年
达拉特旗	3.93	3.93	3.93	4.41	4.78	5.59	1.12	1.21	1.42
准格尔旗	1.60	1.60	1.60	1.61	1.73	2.23	1	1.08	1.39
杭锦旗	2.96	2.96	2.96	3.16	3.43	4.08	1.06	1.15	1.37
库布齐沙漠	8.39	8.39	8.39	9.18	9.94	11.90	1.09	1.18	1.41

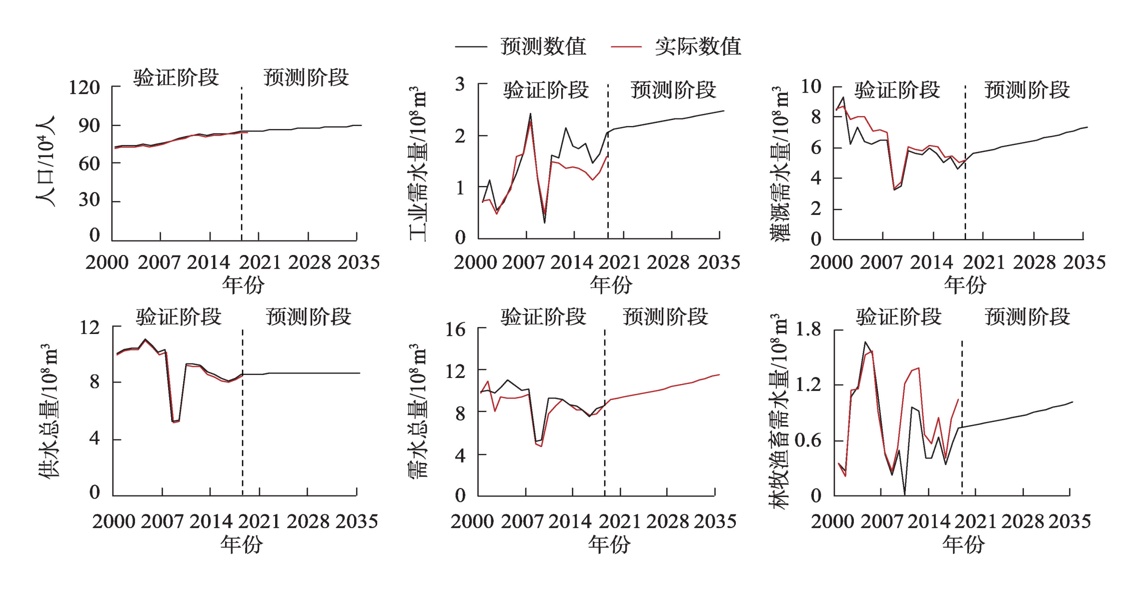


图6 基于SD模型预测2000—2035年主要指标变化趋势

Fig. 6 Based on the SD model to predict the change trend of main indicators from 2000 to 2035

临界状态。杭锦旗承载状态略高于达拉特旗,主要原因是库布齐沙漠地区的黄河引水工程是利用杭锦旗的独特地势特点将处于凌汛期的黄河水引入该地区,因此杭锦旗承载状态相对良好。

根据指标预测趋势曲线可以明显看出,工业需水量、农田灌溉需水量和林牧渔畜业需水量均呈现

不断增长的趋势，且灌溉需水量增加率高于其他指标；需水总量呈上升趋势，可供水量维持不变，常规模式下供需矛盾突出。因此，该区域水资源量供需不平衡，若保持现状持续发展，水资源承载力将持续处于超载状态。

3.2 不同情景承载状态调控SD模型模拟结果分析

3.2.1 调控情景设计　生活需水量参数的调控参照《内蒙古自治区行业用水定额》要求，2025年鄂尔多斯市城镇居民与农村居民人均生活需水定额分别为135 L·人$^{-1}$·d^{-1}和60 L·人$^{-1}$·d^{-1}，2035年为150 L·人$^{-1}$·d^{-1}和80 L·人$^{-1}$·d^{-1}（表4）。考虑库布齐沙漠区域用水以农田灌溉用水为主，主要受灌溉面积、灌溉方式及亩均灌溉定额影响，因此根据《鄂尔多斯市国民经济发展第十四个五年规划纲要》《内蒙古自治区用水定额》及《全国水资源综合规划》，分别假定库布齐沙漠区域内的3个旗县农作物播种面积保持不变，在此条件下保持现状灌溉用水方式（S1）和实施滴灌不同灌溉普及率水平产生的用水变化（滴灌用水量是喷灌的1/3）；其他参数依据现状数据进行仿真模拟后得出，不做额外设定。

3.2.2 不同情景模拟结果分析　通过《鄂尔多斯市国民经济发展第十四个五年规划纲要》《鄂尔多斯市政府工作报告》等文件中的参数进行仿真模拟，至2035年库布齐沙漠人口增长至101.73×10^{4}人，较2019年增长20.3%。依据国民经济发展速度的预测，至2035年库布齐沙漠GDP较2019年增加73.67%。在模拟过程中发现，该地区工业、生活两方面的需水量呈不断增加趋势，面对社会经济的迅速发展，这一结果呈必然趋势，因此在不断增长的趋势下只能通过提高工业用水效率、利用节水高效用水等措施降低用水量增长率。农业是库布齐沙漠区域最主要的用水部门，多用于灌溉用水，因此应加强用水效率管理，提高灌溉保证率、减少水资源浪费才能有效缓解该区域用水紧张局面。根据调控情景模拟结果如图7。

在S1情景下，灌溉需水量维持现状不发生改变，2035年库布齐沙漠需水量达9.76×10^8 m^3，较2019年增加3.38×10^8 m^3，若按此方案发展，在可预见范围内水资源供需严重不平衡。在S2~S4情景下2035年库布齐沙漠区域社会经济需水总量分别达

表4　库布齐沙漠区域需水情景及参数调控

Tab. 4　Regional water use scenarios and parameter adjustments in the Kubuqi Desert

情景参数	情景方案	达拉特旗		杭锦旗		准格尔旗	
		2025年	2035年	2025年	2035年	2025年	2035年
城镇生活需水定额/(L·人$^{-1}$·d^{-1})		135	150	135	150	135	150
农村生活需水定额/(L·人$^{-1}$·d^{-1})		60	80	60	80	60	80
滴灌普及率/%	S1	18	18	18	18	18	18
	S2	25	25	25	25	25	25
	S3	25	50	25	50	25	50
	S4	50	75	50	75	50	75

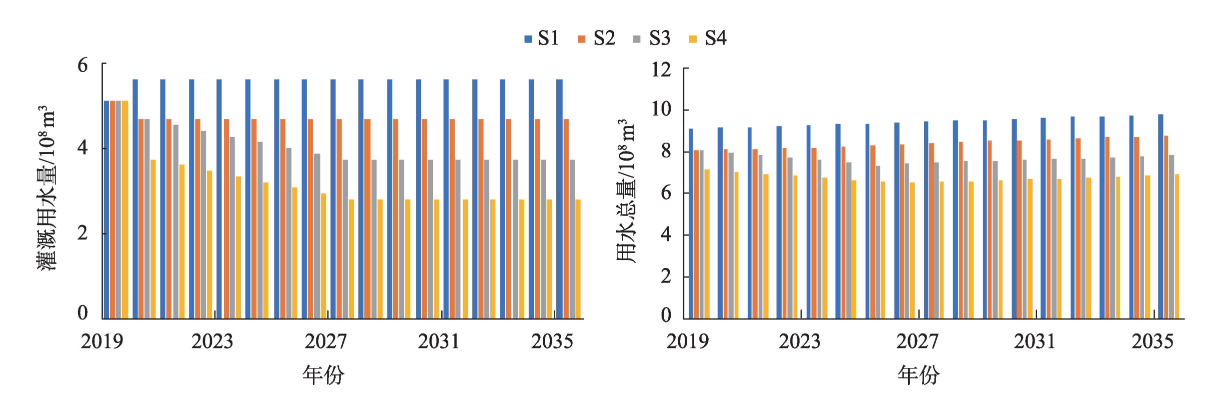


图7　S1~S4不同情景方案下模拟趋势

Fig. 7　Simulation trend under different scenarios of S1–S4

8.73×10^8 m³、7.80×10^8 m³、6.87×10^8 m³；由模拟结果可知，当实际条件达到S3情景条件即可呈现需水总量小于供水总量，呈现可载状态，若想实现2035年库布齐沙漠呈现可载状态，2025年滴灌普及率应≥25%，2035年达到50%。

依据假设的4种情景预测结果，在农田灌溉面积维持不变条件下，滴灌普及率越高，灌溉需水量越低，社会经济需水量随之降低。在农作物种植面积占有量大的达拉特旗推广滴灌具有显著效果，在75%的滴灌普及率条件下，可为达拉特旗节约25%的用水量。库布齐沙漠农业节水需从提高滴灌普及率方面考虑。

综上所述，退耕还林等措施依旧是目前对该区域环境整治的重点措施，但能够采取节水的措施有限，不能仅仅依赖于节水成效，应该将研究重点放在水资源高效利用方面以及有效的水、能源和粮食管理体系，现状水资源用水管理制度对粮水之争的局面造成一定的加剧影响。因此，在未来研究中可深入地考虑更多对该地区水资源高效利用和生态恢复治理的影响。

4 结 论

本文基于系统动力学，对该区水资源系统现状情况以及未来不同情景下状态进行模拟。通过仿真计算得到主要结论如下：

（1）在1999—2019年期间，社会经济用水量大幅增长（增幅88%），农业用水量及其驱动指标对区域可利用水量具有显著影响。农业用水占比呈逐渐下降趋势；生活和工业用水占比小，但总体呈上升趋势。

（2）对2019—2035年常规模式水资源承载状态模拟后，研究区水资源承载力将处于超载状态，且需水总量达11.90×10^8 m³；2019年达拉特旗和杭锦旗呈现超载状态（缺水指数>1），准格尔旗处于承载临界状态。

（3）根据不同设计情景下调控方案进行预测（S2~S4），当滴灌保证率控制到50%以上的条件下呈现可载状态，需水量为7.80×10^8 m³。说明控制库布齐沙漠用水量的增加主要依靠减少农业用水、加大农业节水的途径实现，进而实现经济社会的可持续发展，有效缓解沙漠水资源危机。

参考文献（References）：

[1] 王睿. 库布齐沙漠东缘防沙治沙生态效益评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 174−179, 188. [Wang Rui. Evaluation of ecological benefit of combating desertification in east edge of Hobq Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 174−179, 188.]

[2] 王睿, 杨国靖. 库布齐沙漠生态治理的生态经济系统耦合分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1391−1400. [Wang Rui, Yang Guojing. Coupling analysis of eco-economic system for ecological management in the Hobq Desert[J]. Arid Land Geography, 2020, 43 (5): 1391−1400.]

[3] 于法稳, 方兰. 黄河流域生态保护和高质量发展的若干问题[J]. 中国软科学, 2020(6): 85−95. [Yu Fawen, Fang Lan. Issues regarding the ecological protection and high-quality development of Yellow River basin[J]. China Soft Science, 2020(6): 85−95.]

[4] 黄昌硕, 耿雷华, 颜冰, 等. 水资源承载力动态预测与调控——以黄河流域为例[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 59−67. [Huang Changshuo, Geng Leihua, Yan Bing, et al. Dynamic prediction and regulation of water resource carrying capacity: A case study on the Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 59−67.]

[5] 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 94−111. [Shi Yafeng, Qu Yaoguang. The Carrying Capacity of Water Resources and Its Reasonable Use of Urumqi River [M]. Beijing: Science Press, 1992: 94−111.]

[6] 吕一河, 傅微, 李婷, 等. 区域资源环境综合承载力研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 130−138. [Lyu Yihe, Fu Wei, Li Ting, et al. Progress and prospects of research on integrated carrying capacity of regional resources and environment[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 130−138.]

[7] 朱薇, 周宏飞, 李兰海, 等. 哈萨克斯坦农业水土资源承载力评价及其影响因素识别[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 254−263. [Zhu Wei, Zhou Hongfei, Li Lanhai, et al. Evaluation on carrying capacity of agricultural water and land resources and identification of affecting factors in Kazakhstan[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 254−263.]

[8] 刘爽, 白洁, 罗格平, 等. 咸海流域社会经济用水分析与预测[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1257−1273. [Liu Shuang, Bai Jie, Luo Geping, et al. Analysis and prediction of socio-economic water use in the Aral Sea Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1257−1273.]

[9] 金菊良, 董涛, 郦建强, 等. 不同承载标准下水资源承载力评价[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 31−39. [Jin Juliang, Dong Tao, Li Jianqiang, et al. Water resources carrying capacity evaluation method under different carrying standards[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 31−39.]

[10] 王建华, 姜大川, 肖伟华, 等.基于动态试算反馈的水资源承载

力评价方法研究——以沂河流域(临沂段)为例[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 724-732. [Wang Jianhua, Jiang Dachuan, Xiao Weihua, et al. Assessment method of water resources carrying capacity based on dynamic trial calculation and feedback: A case study on the Yihe River (Linyi section)[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 724-732.]

[11] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395. [Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Yan Huimin, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th Century: From theory to practice[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 379-395.]

[12] Tian Jing, Guo Shenglian, Deng Lele, et al. Adaptive optimal allocation of water resources response to future water availability and water demand in the Han River basin, China[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 7879.

[13] 郭维红, 黄珺嫦, 张二超. 基于SD模型的河南省水资源承载力模拟研究[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(4): 689-697. [Guo Weihong, Huang Junchang, Zhang Erchao. Simulation study of water resource carrying capacity in Henan Province based on SD model[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(4): 689-697.]

[14] 刘昆. 基于榆林市资源环境承载力的计量分析[J]. 西部皮革, 2020, 42(2): 88-90. [Liu Kun. Quantitative analysis based on the carrying capacity of resources and environment in Yulin City[J]. West Leather, 2020, 42(2): 88-90.]

[15] 崔丹, 陈馨, 曾维华. 水环境承载力中长期预警研究——以昆明市为例[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1174-1184. [Cui Dan, Chen Xin, Zeng Weihua. Investigations on the medium-to-long term early warning of water environmental carrying capacity: A case study of Kunming City[J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 1174-1184.]

[16] 位帅, 陈志和, 梁剑喜, 等. 基于SD模型的中山市水资源系统特征及其演变规律分析[J].资源科学, 2014, 36(6): 1158-1167. [Wei Shuai, Chen Zhihe, Liang Jianxi, et al. Analysis of water resource system characteristics and variation law for Zhongshan city based on system dynamics[J]. Resources Science, 2014, 36(6): 1158-1167.]

[17] 金菊良, 沈时兴, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 507-520. [Jin Juliang, Shen Shixing, Cui Yi, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River diversion irrigation district based on semipartial subtraction set pair potential [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(5): 507-520.]

[18] 王耕, 李优. 基于SD模型的城市生活垃圾资源化处理模拟研究——以大连市为例[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(5): 493-500. [Wang Geng, Li You. Simulation of municipal solid waste resource recovery based on system dynamics model: The case of Dalian[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6 (5): 493-500.]

[19] 林龙圳, 李达, 林震. 基于熵权-TOPSIS模型的库布齐沙漠地区水资源承载力评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(4): 640-648. [Lin Longzhen, Li Da, Lin Zhen. Evaluation of water resources carrying capacity in Kubuqi Desert Area based on entropy weight and TOPSIS model[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 54(4): 640-648.]

[20] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 人工固沙区植被演替过程中土壤水分时空分异特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 881-889. [Wang Bo, Duan Yuxi, Wang Weifeng, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture content during vegetation succession in sand-binding areas[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 881-889.]

[21] 曲修齐, 刘淼, 李春林, 等. 环渤海地区综合承载力评估与预测[J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 552-560. [Qu Xiuqi, Liu Miao, Li Chunlin, et al. Evaluation and prediction of the comprehensive carrying capacity in the Bohai-Ring region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(3): 552-560.]

[22] 翟晨阳, 王圣云. 基于系统动力学的鄱阳湖区多维福祉时空差异演变与情景模拟[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 2954-2967. [Zhai Chenyang, Wang Shengyun. Spatio-temporal difference evolution and scenario simulation of multi-dimensional well-being in Poyang Lake area based on system dynamics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 2954-2967.]

[23] 朱文礼, 张礼兵, 伍露露, 等. 基于系统模拟的县域水资源承载力动态预测及调控研究——以庐江县为例[J]. 中国农村水利水电, 2020(2): 16-22. [Zhu Wenli, Zhang Libing, Wu Lulu, et al. Research on the dynamic prediction and regulation of quantitative and quality elements of water resources carrying county: Level capacity based on system dynamics method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(2): 16-22.]

[24] 康艳, 闫亚廷, 杨斌. 基于LMDI-SD耦合模型的绿色发展灌区水资源承载力模拟[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 150-160. [Kang Yan, Yan Yating, Yang Bin. Simulation of water resource carrying capacity based on LMDI-SD model in green development irrigation areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 150-160.]

[25] 秦欢欢, 赖冬蓉, 万卫. 江西省用水结构变化及影响因素分析[J]. 江西水利科技, 2018, 44(5): 324-329, 368. [Qin Huanhuan, Lai Dongrong, Wan Wei. Analysis of water use structure variation and its influence factors for Jiangxi Province[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2018, 44(5): 324-329, 368.]

[26] Wang Huan, Zai Meimei. Research on the evaluation model of multi-objective optimal allocation of water resources in Guizhou Province[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 914(1): 012018.

[27] 姚翠友, 陈国娇, 张阳. 基于系统动力学的城市生态系统建设路径研究——以天津市为例[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1921-1930. [Yao Cuiyou, Chen Guojiao, Zhang Yang. Research on construction path of urban ecosystem based on system dynamics: The case of Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40 (5): 1921-1930.]

[28] 张思俊, 何莉, 吴霜, 等. 宣化区农业水资源系统仿真与优化配

置[J]. 湖北工业大学学报, 2020, 35(1): 29−32, 37. [Zhang Sijun, He Li, Wu Shuang, et al. Simulation and optimal allocation of agricultural water resources system in Xuanhua district[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2020, 35(1): 29−32, 37.]

[29] 张礼兵, 胡亚南, 金菊良, 等. 基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 242−254. [Zhang Libing, Hu Ya'nan, Jin Juliang, et al. Dynamic prediction of water resources carrying capacity of Chaohu Basin and system optimization regulation based on system dynamics simulation[J]. Lake Sciences, 2021, 33(1): 242−254.]

[30] 李经伟, 张文丽. 露天煤矿用水合理性与节水潜力分析[J]. 海河水利, 2016(1): 9−11. [Li Jingwei, Zhang Wenli. Analysis of hydration rationality and water saving potential of surface coal mine[J]. Haihe Water Resources, 2016(1): 9−11.]

[31] 吴卫宾, 韩锦辉, 杨天通, 等. 基于SD双要素模型的长春市水资源人口承载力动态模拟[J]. 郑州大学学报(理学版), 2017, 49(4): 126−131. [Wu Weibin, Han Jinhui, Yang Tiantong, et al. Dynamic simulation of population carrying capacity of urban water resource of Changchun based on system dynamics and two dimension mix model [J]. Journal of Zhengzhou University(Naturnal Science Edition), 2017, 49(4): 126−131.]

[32] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于可拓云模型的干旱区水资源安全评价——以石河子垦区为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 847−856. [Zhang Zhijun, Chen Fulong, Long Aihua, et al. Assessment of water resource security in an arid area based on an extension cloud model: A case study of Shihezi District[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 847−856.]

[33] 刘苏英, 韩会玲. 浅谈坝上地区节水型农业模式[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 117−119, 123. [Liu Suying, Han Huiling. Simple analysis the model of water conservation in agriculture production at Bashang region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(2): 117−119, 123.]

[34] Peng Tao, Deng Hongwei, Lin Yun, et al. Assessment on water resources carrying capacity in Karst areas by using an innovative DPESBRM concept model and cloud model[J]. Science of the Total Environment, 2020, 767: 144353.

Dynamic simulation and carrying capacity analysis of a water resource system in Kubuqi Desert

LU Fangyuan[1,2], JIA Debin[1,2], GAO Ruizhong[1,2], SU Wenxu[1,2], ZHAO Hang[1,2], YANG Li'na[1,2]

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on the integration of water resources and socio-economic data in the Kubuqi Desert from 1999 to 2019, this paper used the system dynamic model to simulate the water resource-society-ecological system of the Kubuqi Desert. In addition, a multi-scenario parameter control model was established to comprehensively simulate the changes in the total water demand of water resources in the region under the influence of different parameters. Results show that if no other measures are taken (conventional development mode), then the total water demand in 2035 will reach 11.90 per one hundred million cubic meters, which is greater than the total water supply in the region, showing an overload state. After adjustment for different parameter schemes, the planting area and current irrigation method remain unchanged, and the water demand is 9.76 per one hundred million cubic meters. In addition, the penetration rate of drip irrigation exceeds 50% (S3), showing a loadable state, and the water demand will drop to 7.80 per one hundred million cubic meters, which alleviates the contradiction between the supply and demand of desert water resources. Therefore, during ecological restoration of the Kubuqi Desert, emphasis should be placed on the promotion of drip irrigation to save water, rational use of local water resources, and sustainable ecological development.

Keywords: water resources carrying capacity; system dynamics; desert; arid area; Kubuqi Desert